ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/277180850

Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen

Article · June 2011

CITATIONS
20

READS
1,388

1 author:

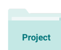


Wilhelm Kuttler
University of Duisburg-Essen

137 PUBLICATIONS **2,254** CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Green Facade Cooling Effect View project

All content following this page was uploaded by Wilhelm Kuttler on 26 July 2015.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

Kuttler *Environmental Sciences Europe* 2011, **23**:11
http://www.enveurope.com/content/23/1/11

Environmental Sciences Europe
a SpringerOpen Journal

REVIEW Open Access

Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen

Climate change in urban areas, Part 1, Effects

Wilhelm Kuttler*

Zusammenfassung

Ziel dieses Beitrags, der in zwei Teilen erfolgt, ist es, die Wirkungen des globalen Klimawandels auf einen Ballungsraum (Ruhrgebiet) zu untersuchen und Gegenmaßnahmen auf lokaler Ebene zu diskutieren.

Im ersten Teil wird auf die Entstehung des natürlichen und anthropogenen Treibhauseffektes eingegangen und deren jeweilige Beiträge an der globalen Überwärmung herausgestellt. Exemplarisch wird auf die jüngere Klimaentwicklung in der Metropolregion Ruhr eingegangen. Zu den durch verschiedene numerische und statistische Modelle projizierten Klimaveränderungen zählen auch die Zunahme thermischer Belastungen für die Stadtbevölkerung sowie die Verstärkung sommerlicher konvektiver Niederschläge mit entsprechenden Abflussspitzen. Unter den Luftverunreinigungen wird es in erster Linie das bodennahe Spurengas Ozon sein, dass bei ansteigenden Temperaturen eindeutig höhere Konzentrationen erwarten lässt, wohingegen die atmosphärischen Feinstaubkonzentrationen ($\leq PM_{10}$) bislang keine enge Bindung an die Temperaturentwicklung erkennen lassen.

Im zweiten Teil der Publikation wird anhand verschiedener anwendungsorientierter Beispiele gezeigt, wie dem globalen Klimawandel auf lokaler Ebene wirksam begegnet werden kann. Hierzu zählen objektbezogene wie auch flächenabhängige Maßnahmen, deren Ziel es ist, sowohl die urbane Überwärmung als auch die Emission an CO_2 wirksam zu reduzieren.

Schlagwörter Stadtklima; globaler Klimawandel; Auswirkungen; Gegenmaßnahmen; Luftverunreinigung; CO_2; O_3; PM_{10}; Ballungsraum; Ruhrgebiet.

Abstract

The objective of this article, which is being published in two parts, is to investigate the effects of global climate change on a conurbation (the Ruhr area) and to discuss local counter-measures.

Part 1 deals with the origins of the natural and anthropogenic greenhouse effects, presents the contributions of the two effects to global warming and discusses recent examples of climate development from the Ruhr metropolis. The climate changes projected by various numeric and statistical models include an increase in thermal stress for city-dwellers and a rise in convective precipitation with corresponding run-off peaks in summer. As regard air pollutants (e.g. O_3, PM_{10}), it will mainly be the concentration of the near-surface trace gas ozone which will be clearly increased with rising temperatures. In contrast, a close correlation between atmospheric fine dust concentrations ($\leq PM_{10}$) and temperature changes has not yet been established.

Part 2 of the publication indicates how global climate change can be effectively combated at the local level using a number of application-oriented examples. These include measures affecting both individual properties and whole areas with a view to reducing urban overheating and CO_2 emissions.

Keywords urban climate; global climate change; effects; counter-measures; air pollution; CO_2; O_3; PM_{10}; conurbation; Ruhr area.

*Correspondence: wiku@uni-due.de
Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, Fakultät für Biologie, Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie, Schützenbahn 70, D-45127 Essen, Germany

SpringerOpen

© 2011 Kuttler; licensee Springer. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/2.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Einleitung

Der globale Klimawandel wird nach Auffassung des Weltklimarates vorrangig durch CO_2 und andere infrarotaktive anthropogene atmosphärische Spurengase verursacht, wodurch die globale Mitteltemperatur der Atmosphäre weiterhin ansteigen soll [1]. Die auch hierauf beruhende Beeinflussung der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre sowie die durch die Heterogenität der Erdoberfläche bedingte Regionalisierung des Klimas, führen zu räumlich unterschiedlich starken Ausprägungen des vorhergesagten Temperaturanstiegs. Zu den Gebieten, die durch den Klimawandel in besonderem Maße betroffen sind, zählen die Metropolregionen der Erde, die sich generell durch hohe Bevölkerungsdichte, starke Oberflächenversiegelung und -erwärmung sowie Luftverschmutzung vom umgebenden Freiland abheben. Um den prognostizierten Wirkungen der Klimaänderungen in urbanen Gebieten begegnen zu können, sollten sich die Stadt- und Umweltplanung dieser Probleme bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt annehmen. Hierauf wird am Beispiel des Ruhrgebiets, Europas größter Metropolregion, in einem zweiteiligen Beitrag eingegangen. Dessen erster Teil beschäftigt sich mit den grundlegenden Aspekten des globalen Treibhauseffektes und seinen erwarteten klimatischen, lufthygienischen und human-biometeorologischen Auswirkungen auf städtischer Ebene. Der zweite Teil widmet sich der Darstellung entsprechender Minderungs- und Anpassungsstrategien, um dem globalen Klimawandel auf lokaler Ebene wirkungsvoll zu begegnen.

Globaler Treibhauseffekt

Für die Atmosphärenforschung ist es als Glücksfall anzusehen, dass im Jahre 1955 der junge amerikanische Chemiker Charles D. Keeling im Rahmen seiner Promotion den Auftrag erhielt, die CO_2-Konzentration der Luft am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii in über 4.000 m ü. NN zu erfassen. Die Messkampagne an dieser Reinluftstation war zunächst für die Dauer von zwei Jahren geplant. Wegen der zunehmenden CO_2-Konzentration während dieser Zeit wurde der Messzeitraum allerdings immer wieder verlängert. Seit nunmehr über 50 Jahren stellt diese kontinuierliche Messreihe den wichtigsten Grundpfeiler in der Diskussion über den anthropogenen Klimawandel dar [2].

Betrug zu Beginn der Messungen die CO_2-Konzentration 315 ppm (0,0315 Vol.%), so ist sie nunmehr auf 387 ppm (2009, Mauna Loa Observatorium, NOAA [3]) angestiegen. Der in Abb. 1 dargestellte Kurvenverlauf repräsentiert diese Zunahme, wobei eine im Jahresverlauf saisonal bedingte sinusartige Periodizität beobachtet werden kann. Die um die Jahreszeitenschwankung bereinigte Kurve stellt die Jahresmittelwerte dar. Die jährliche CO_2-Zuwachsrate, die jeweils für einen Zeitraum von fünf Jahren berechnet wurde, ergibt, dass sich der mittlere jährliche Konzentrationsanstieg von anfangs 0,5 ppm/a in den vergangenen 20 Jahren auf den nunmehr über vierfachen Wert (> 2 ppm/a) erhöht hat.

Die hier dargestellten CO_2-Gehalte der Atmosphäre sollten allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass der Treibhauseffekt nicht nur durch Kohlendioxid, sondern auch durch weitere strahlungsabsorbierende Gase, insbesondere Wasserdampf, aber auch Methan (CH_4) und andere Spurengase, verursacht wird.

Für das Verständnis des Klimawandels ist es grundsätzlich sinnvoll, zwischen einer auf natürlichen Ursachen beruhenden Erwärmung der Erdatmosphäre (**natürlicher Treibhauseffekt**) und einer zusätzlichen, durch den Menschen bedingten Temperaturerhöhung (zusätzlicher bzw. **anthropogener** Treibhauseffekt) zu unterscheiden [4].

Der **natürliche Treibhauseffekt** wird im Wesentlichen durch den strahlungsabsorbierenden Wasserdampf (Anteil: > 3/5) und CO_2 (~1/5) – aber auch in geringerem Maße durch CH_4, N_2O und O_3 – verursacht. Dabei absorbieren im Wellenlängenbereich 8 μm ≥ λ > 18 μm im Wesentlichen Wasserdampf und im Spektralbereich 13 μm < λ < 18 μm hauptsächlich CO_2-Moleküle die langwellige Strahlung fast vollständig. Diese Energie wird von der Atmosphäre aufgenommen und führt dazu, dass sich eine globale Durchschnittstemperatur von etwa 15 °C einstellt. Festzuhalten bleibt, dass hauptsächlich der atmosphärische Wasserdampf sowie die weiteren genannten Spurenstoffe als „natürliche Treibhausgase" erst die Voraussetzung dafür schaffen, dass Leben auf der Erde in der uns bekannten Form möglich ist. Denn ohne den natürlichen Treibhauseffekt beliefe sich die mittlere Lufttemperatur der Erde auf etwa -18 °C. Durch den natürlichen Treibhauseffekt wird somit eine um 33 K höhere und damit lebensfreundliche Temperatur sichergestellt. Während der natürliche Treibhauseffekt lebensnotwendig ist, kann das vom **zusätzlichen Treibhauseffekt** nicht unbedingt gesagt werden, da er die mittlere Temperatur der Erde über die genannten 15 °C hinaus ansteigen lässt und einen anthropogenen Klimawandel bewirkt. Der zusätzliche Treibhauseffekt wird im Gegensatz zum natürlichen Treibhauseffekt hauptsächlich durch anthropogenes CO_2 (> 3/5), CH_4 (< 1/5), aber auch durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), O_3 und N_2O verursacht.

Das zusätzlich in die Atmosphäre eingebrachte CO_2 beruht vornehmlich auf Verbrennungsprozessen fossiler Energieträger (vollständige Oxidation des Kohlenstoffs) und der Zerstörung der Vegetation (zum Beispiel Abholzen der tropischen Regenwälder).

Wichtige Emissionsquellen für CH_4 stellen intensive Rinderhaltung, Reisanbau, Leckagen von Erdgasleitungen sowie entweichendes Methan aus steinkohlefördernden

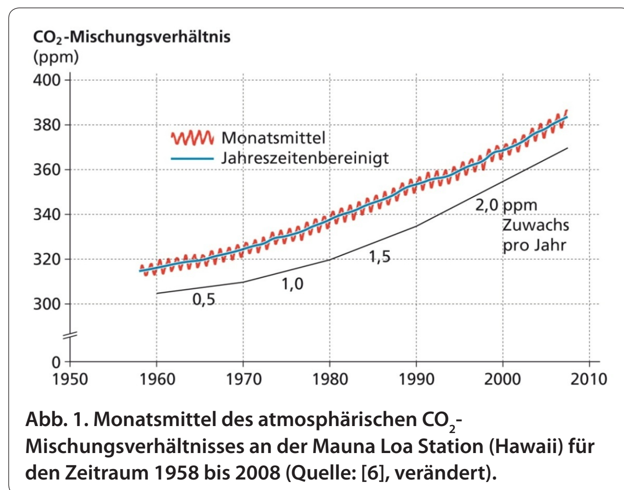


Abb. 1. Monatsmittel des atmosphärischen CO_2-Mischungsverhältnisses an der Mauna Loa Station (Hawaii) für den Zeitraum 1958 bis 2008 (Quelle: [6], verändert).

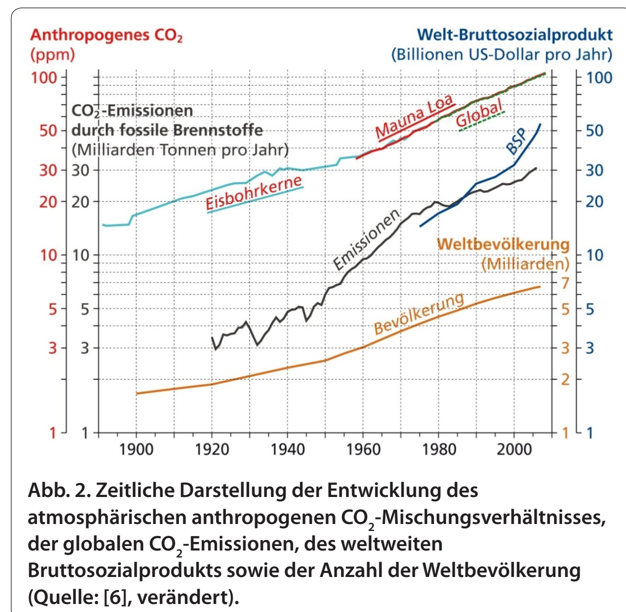


Abb. 2. Zeitliche Darstellung der Entwicklung des atmosphärischen anthropogenen CO_2-Mischungsverhältnisses, der globalen CO_2-Emissionen, des weltweiten Bruttosozialprodukts sowie der Anzahl der Weltbevölkerung (Quelle: [6], verändert).

Zechen und auftauenden Permafrostböden sowie offenbar auch Pflanzen dar.

Die Gruppe der FCKW wie Dichlordifluormethan (CCl_2F_2) und Trichlormonofluormethan (CCl_3F), die als Treibmittel in Spraydosen, Kühlmittel und zur Herstellung von Polyurethanschaumstoffen verwendet wurden (Produktionsstopp 1995), wirken sich nicht nur thermisch immer noch aus, sondern verursachen wegen ihrer langen Lebensdauer und der photolytischen Freisetzung hochreaktiver Chlorradikale auch einen Abbau des stratosphärischen Ozons.

Troposphärisches Ozon (O_3) wird im Sommer überwiegend während warmer, strahlungsreicher Hochdruckwetterlagen in Gegenwart von Stickstoffoxiden (NO_x), dem bei hohen Temperaturen instabilen Peroxyacetylnitrat (PAN) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs), die sowohl anthropogener als auch biogener Herkunft sein können, gebildet.

Distickstoffmonoxid bzw. Lachgas (N_2O) gelangt schließlich durch mikrobielle Denitrifikation in die Atmosphäre. Auch lassen die Abholzung der tropischen Regenwälder und die Verwendung stickstoffhaltiger Mineraldünger (Nitrate) in der Landwirtschaft die atmosphärische N_2O-Konzentration ansteigen.

Um die Effektivität der genannten Spurengase auf den globalen Treibhauseffekt vergleichend einschätzen zu können, wird deren thermische Wirksamkeit mit Hilfe des CO_2 normiert und damit eine CO_2-Äquivalenz hergestellt [5]. Die normierte Größe wird **Globales Erwärmungspotenzial** (Global Warming Potential, GWP, Treibhauspotenzial) genannt. Hierunter versteht man das auf 1 kg Kohlendioxid bezogene Vielfache der thermischen Wirksamkeit eines Spurenstoffes unter Zugrundelegung eines Vergleichszeitraumes (zum Beispiel 100 Jahre). So weisen 1 kg Methan (CH_4) die gleiche thermische Wirkung auf wie 25 kg CO_2 oder 1 kg Distickstoffmonoxid (N_2O) wie 200 kg CO_2.

Da der vorindustrielle globale Wert des CO_2-Mischungsverhältnisses übereinstimmend mit 280 ppm CO_2 angegeben wird [1] und sich die gegenwärtige Konzentration auf über 387 ppm (2009) beläuft, beträgt der anthropogene Anteil derzeit mehr als 100 ppm. Dessen zeitabhängige Entwicklung ist zusammen mit der Zunahme der globalen CO_2-Emissionen, der Weltbevölkerung und des globalen Bruttosozialprodukts in Abb. 2 dargestellt. Die Kurve der anthropogenen CO_2-Konzentration zeigt, dass die Werte seit Beginn der Messungen im Jahre 1958 außergewöhnlich stark angestiegen sind (vgl. auch Abb. 1). Denn die vor dieser Zeit aus Eisbohrkernen analysierten Daten („Stellvertreter“ oder „Proxydaten“) lassen lediglich eine Zunahme um etwa 35 ppm erkennen, während zwischen 1958 und 2008 der anthropogene Anteil bereits auf über 100 ppm angestiegen ist. Die Koinzidenz zwischen der Zunahme der Weltbevölkerung und derjenigen der CO_2-Emissionen (Stand 2008: Global 31 Mrd. t CO_2, Anteil Deutschlands: 2,7 %) ist offensichtlich. Hierfür fanden Hofmann et al. [6] folgenden statistischen Zusammenhang: $CO_2 = 7{,}72 \cdot p^{1{,}35}$ (mit CO_2 in ppm und p der Bevölkerungsanzahl in Milliarden).

Die Frage, in welcher Abhängigkeit die mittlere globale Lufttemperatur zur CO_2-Konzentration steht und in welchem Maße letztere für den Anstieg ersterer verantwortlich ist, lässt sich am besten klären, indem man entsprechende Verlaufskurven beider Parameter für den gleichen Zeitraum darstellt. In Abb. 3 werden die Jahresmittel der global gemessenen Lufttemperatur zwischen 1860 und 2008 dargestellt. Es zeigt sich der durch interannuelle Schwankungen bestimmte allgemeine Trend eines weltweiten Temperaturanstiegs. Vergleicht

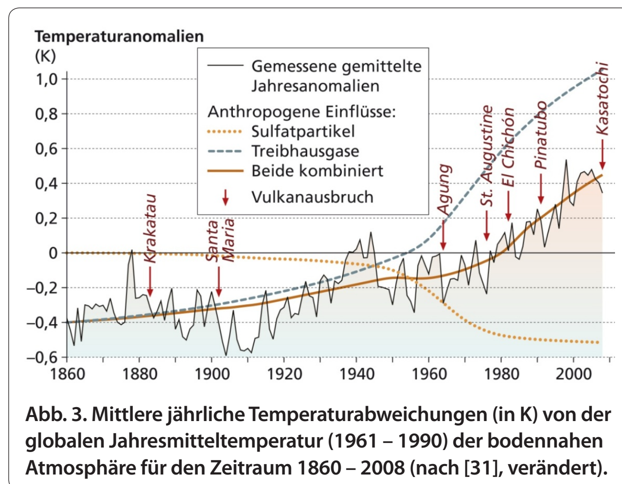


Abb. 3. Mittlere jährliche Temperaturabweichungen (in K) von der globalen Jahresmitteltemperatur (1961 – 1990) der bodennahen Atmosphäre für den Zeitraum 1860 – 2008 (nach [31], verändert).

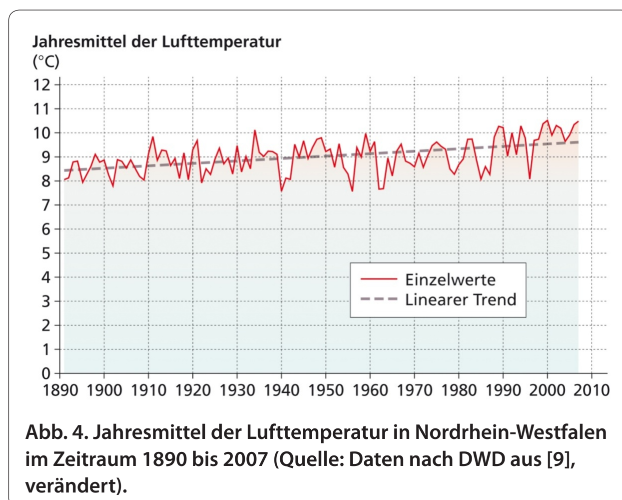


Abb. 4. Jahresmittel der Lufttemperatur in Nordrhein-Westfalen im Zeitraum 1890 bis 2007 (Quelle: Daten nach DWD aus [9], verändert).

man die gemessene Temperaturkurve mit einer ausschließlich auf der Wirkung von Treibhausgasen modellierten Temperaturentwicklung, ergeben sich zum Teil deutliche Unterschiede, die insbesondere ab 1950 zu einer Überschätzung des Einflusses von Treibhausgasen auf die Lufttemperatur führen. Eine wesentlich bessere Anpassung zwischen den gemessenen Lufttemperaturen und den auf Modellrechnungen basierenden Ergebnissen der Treibhausgase zeigt sich, wenn die temperatursenkende Wirkung des in die Troposphäre und Stratosphäre eingebrachten und gebildeten anthropogenen bzw. vulkanischen Sulfataerosols mitberücksichtigt wird. Denn insbesondere in die hohe Atmosphäre eingebrachte Sulfatpartikel führen durch Abschwächung der Sonnenstrahlung („solar dimming", [7]) zur Abkühlung der Atmosphäre. Verschneidet man die modellierten Kurven der Wirkung der Treibhausgase auf die Lufttemperatur mit derjenigen der Sulfatpartikelkonzentrationen, so wird der gemessene Verlauf der Lufttemperatur mit einer erklärten Varianz von immerhin 80 % durch die Modellrechnungen recht gut wiedergegeben.

Die Intensität der kühlenden Wirkung durch das Sulfat hängt dabei von seiner Konzentration in der Troposphäre und Stratosphäre ab. Eine besonders starke Temperaturreduktion ist immer dann zu erwarten, wenn zum Beispiel durch Vulkanausbrüche große Mengen an Schwefeldioxid in die hohe Atmosphäre gelangen und dieses zu Sulfatpartikeln umgewandelt wird („gas-to-particle-conversion", [8]). Allerdings sorgt auch das durch menschliche Aktivitäten in die untere Atmosphäre eingebrachte, hauptsächlich auf der Verbrennung fossiler Energieträger beruhende SO_2 für eine Erhöhung der Sulfatpartikelkonzentration.

Metropolregion Ruhr - Jüngere Klimaentwicklung und prognostizierte Auswirkungen des globalen Klimawandels

Bevor die projizierten Auswirkungen des globalen Klimawandels am Beispiel der Metropolregion Ruhr behandelt werden, soll anhand vorliegender Datenreihen exemplarisch auf die jüngere klimatische Entwicklung dieses Raumes eingegangen werden. Unter der Metropolregion Ruhr wird synonym das Ruhrgebiet verstanden, das etwa zwischen den Städten Duisburg und Dortmund sowie den Flüssen Ruhr und Lippe liegt, eine Fläche von rund 4.500 km^2 einnimmt und ein zentraler Teil des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen (NRW) ist.

Jüngste Klimaentwicklung

Für die Darstellung der jüngeren Klimaentwicklung dieses Raumes wird auf das Datenkollektiv von NRW zurückgegriffen, um auch die klimatische Entwicklung der Randgebiete des Ruhrgebietes mit abdecken zu können. Für die Temperaturentwicklung seit Ende des 19. Jahrhunderts ergibt sich auf der Grundlage langjähriger Gebietsmittelwerte für NRW folgendes Bild: Zwischen 1890 und 2007 hat die durchschnittliche Lufttemperatur in Nordrhein-Westfalen – gemittelt über alle Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) – linear von 8,4 °C auf 9,6 °C zugenommen (Abb. 4). Das entspricht unter Berücksichtigung eines linearen Temperaturtrends einer Zunahme von etwa 1 K/100 a. Allerdings verläuft der Anstieg der Lufttemperaturen in den Jahren nach 1980 stärker als es vorher der Fall war. Auch wurde festgestellt, dass die Erwärmung zwar in jedem Monat zu beobachten ist, besonders stark jedoch im Herbst auftritt [9].

Der Niederschlag ist unter den Klimaelementen dasjenige mit der größten räumlichen und zeitlichen Variabilität. Es ist deshalb besonders schwierig, verlässliche Aussagen über kurze Zeiträume und kleine Flächen zu treffen. Aus diesem Grunde wurde wiederum auf das für Nordrhein-Westfalen zur Verfügung stehende Gebietsmittel zurückgegriffen. Die in Abb. 5 dargestellte lange Reihe (1890-2007) verdeutlicht, dass sich im Jahre 1890 die Jahresniederschlagssumme auf 790 mm belief,

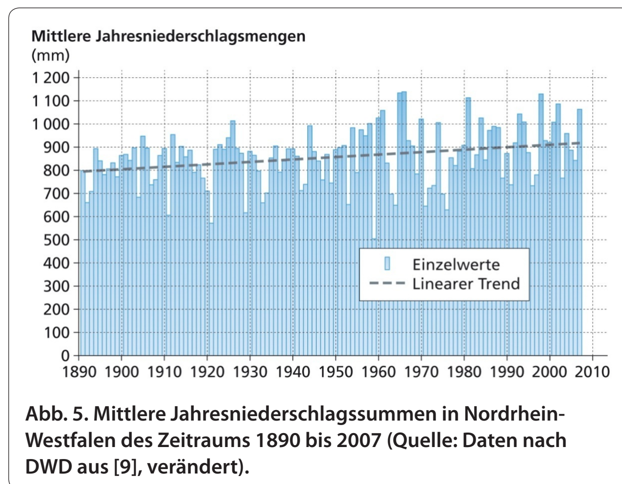


Abb. 5. Mittlere Jahresniederschlagssummen in Nordrhein-Westfalen des Zeitraums 1890 bis 2007 (Quelle: Daten nach DWD aus [9], verändert).

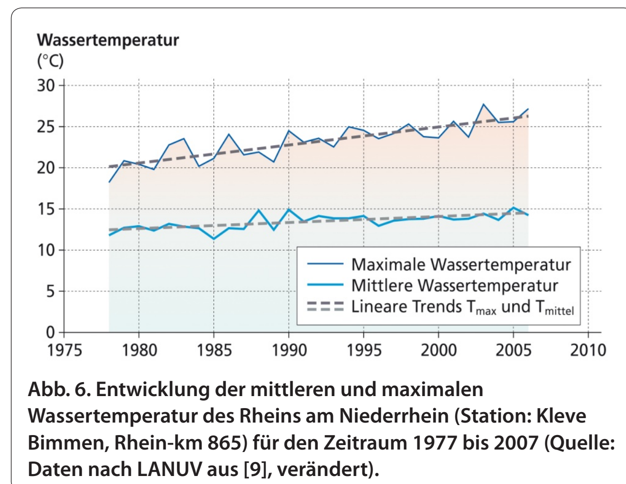


Abb. 6. Entwicklung der mittleren und maximalen Wassertemperatur des Rheins am Niederrhein (Station: Kleve Bimmen, Rhein-km 865) für den Zeitraum 1977 bis 2007 (Quelle: Daten nach LANUV aus [9], verändert).

während es im Jahre 2007 etwa 910 mm waren. Die absolute Spannweite der Jahresmittelwerte der Messreihe erstreckt sich dabei von unter 500 mm bis zu über 1.100 mm. Folgt man dem linearen Trend, dann ist die mittlere Jahresniederschlagssumme seit Beginn der Messungen um etwa 100 mm/100 a angestiegen, wobei seit 1980 auch eine Zunahme der Anzahl der Jahressummen von ≥ 1.000 mm bei geringeren interannuellen Schwankungen im Vergleich zu den Vorjahreszeiträumen zu verzeichnen ist.

Die Auswertung der thermischen und pluvialen Gebietsmittelwerte für NRW zeigt, dass es Tendenzen zu einem wärmeren und feuchteren Klima gibt. Die Frage, welche Auswirkungen dadurch bisher auf wichtige Umweltmedien nachgewiesen werden können, soll am Beispiel der Wassertemperatur des Rheins und der Pflanzenphänologie beantwortet werden.

Für die Beschreibung der Änderung der Wassertemperatur des Rheins kann mittlerweile auf eine über dreißigjährige Datenreihe zurückgegriffen werden (Abb. 6). Diese zeigt, dass im Verlauf der Zeit nicht nur die Mittelwerte der Wassertemperaturen angestiegen sind (seit 1977 um 1,2 K), sondern auch die Maximumtemperaturen zugenommen haben. Auffallend ist ferner, dass es seit 1995 zu einem häufigeren Überschreiten der 25 °C Temperaturmarke gekommen ist, als in den Jahren davor. Diese Erhöhung eventuell auf verstärkte Abwärmeeinleitungen von Kraftwerken zurückzuführen, kann ausgeschlossen werden, da der Umfang der Abwärmeeinleitungen in den vergangenen Jahren rückläufig ist [9].

Besonders eindrucksvoll lassen sich Klimaveränderungen mit Hilfe pflanzenphänologischer Untersuchungen veranschaulichen, da Pflanzen standorttreu sind und ihr Wachstum mit Ausnahme der Wasserversorgung im Wesentlichen thermisch gesteuert wird. Die ansteigenden Temperaturen haben offensichtlich dazu geführt, dass der Blühbeginn für die drei hier exemplarisch dargestellten Sträucher Hasel, Kornelkirsche und Schlehe, zwischen 1951 bis 2005 eine mehr oder weniger deutliche Vorverlegung von durchschnittlich 15 bis 20 Tagen aufweisen, was hauptsächlich auf die höheren Wintertemperaturen zurückzuführen sein dürfte. Auch kommt es durch die früheren Blühtermine zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode [9].

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass auf der Basis der hier verwendeten langjährigen Daten die Lufttemperaturen und die Niederschlagssummen in NRW zugenommen haben und sich entsprechende thermische Wirkungen in den Umweltmedien Wasser und Vegetation bereits nachweisen lassen. Welche Veränderungen klimatischer und lufthygienischer Art sich durch den Klimawandel im Ruhrgebiet ergeben, wird nachfolgend untersucht.

Projizierte Auswirkungen

Für Mitteleuropa und damit auch für das Ruhrgebiet wird davon ausgegangen, dass es zu folgenden Auswirkungen durch den globalen Klimawandel kommt (nach [1], verändert und ergänzt):

- Weniger Sommer-, mehr Winterniederschläge
- Häufigere Sommergewitter mit Starkregenabflussspitzen (Überschwemmungsgefahr) sowie Schlagregen auf Hauswände (mit der Folge erhöhter Schmutzstofffrachten durch den die Wände abwaschenden Regen)
- Ansteigende Temperaturen
- Änderung der Wetterlagencharakteristik: Zunahme austauscharmer Wetterlagen, thermischer Extremwerte sowie der Häufigkeit, Dauer und Intensität städtischer Wärmeinselereignisse
- Anstieg der Ozonkonzentration

Auf die genannten Klimaänderungen wird nachfolgend näher eingegangen. Dabei werden Stationswerte bzw. Modellberechnungen auf regionaler Basis für das Ruhrgebiet zugrundegelegt.

Niederschläge

In Hinblick auf die zukünftige Verteilung der Jahresniederschläge lässt sich auf Basis des numerischen Modells WETTREG [10] exemplarisch für die Stadt Essen (2009: 580.000 EW) im mittleren Ruhrgebiet feststellen, dass die Sommerniederschläge (JJA) während des Zeitraums 2091-2100 auf 76 % des Wertes der Bezugsepisode (1991-2000) zurückgehen werden. Die Winterniederschläge (DJF) sollen hingegen auf 168 % der Bezugsepisode ansteigen. Eine prognostizierte Zunahme sommerlicher konvektiver Starkregen mit Niederschlagssummen von beispielsweise mehr als 17 mm/h kann in Gebieten mit hoher Oberflächenversiegelung und in Senken zu Überschwemmungen führen sowie auf vegetationsfreien, geneigten Flächen Bodenabtrag durch Erosion verursachen [11].

Grundsätzlich ist zu den Ergebnissen, die mit numerischen Modellen erzielt werden, anzumerken, dass diese – nach wie vor – als relativ unsicher anzusehen sind. So weichen die mit anderen Regionalmodelltypen (zum Beispiel STAR II) generierten Niederschlagsdaten für den gleichen Standort und die genannte Bezugsepisode im Jahresmittel um 20 % von den oben genannten WETTREG Ergebnissen ab. Eine Lösung des Problems kann darin gesehen werden, dass im Rahmen der Standortaussage anstatt konkreter Prognosedaten die Ergebnisse der Gesamtheit verschiedener Modellläufe als möglicher variierender Wertebereich unter Nennung der Spannweite und des wahrscheinlichsten Mittelwertes samt Standardabweichung deklariert werden. Eine solche Generierung von Werten nennt man auch „Multimodellsimulation" [1] oder „Ensembleverfahren", da man die Gesamtheit der Berechnungsmöglichkeiten der zur Verfügung stehenden Modelle nutzt.

Die Auswirkungen des Klimawandels sind nach den vorliegenden Modellaussagen vielfältig. So wird es nicht nur zu einer langfristigen Veränderung des thermischen und pluvialen Klimas auf regionaler Ebene kommen, sondern es wird sich auch großräumig das Spektrum der Großwetterlagen hinsichtlich ihrer Art, Häufigkeit, Dauer und Luftmassencharakteristik ändern [10]. Offensichtlich scheinen austauscharme Witterungsabschnitte mit mächtigeren Temperaturinversionen in ihrer Häufigkeit in Mitteleuropa zuzunehmen [12,13]. Derartige Wetterlagen sind im Wesentlichen an das Vorherrschen von Hochdruckgebieten gebunden, die sich durch Windarmut und stabile Schichtung sowie im Sommer – wegen der weitgehenden Wolkenlosigkeit – durch starke Sonneneinstrahlung und nächtliche negative Strahlungsbilanz auszeichnen. Hierdurch wird die Ausprägung des autochthonen, das heißt eigenbürtigen, mithin lokalen Klimas begünstigt, mit der Folge einer Verschärfung des thermischen Stadt-Umland-Gegensatzes aufgrund der unterschiedlichen Wärmeeigenschaften zwischen versiegelten und nicht versiegelten Flächen [14].

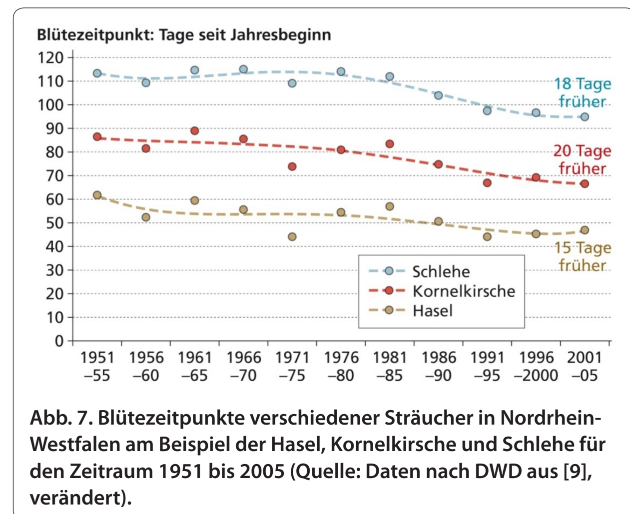


Abb. 7. Blütezeitpunkte verschiedener Sträucher in Nordrhein-Westfalen am Beispiel der Hasel, Kornelkirsche und Schlehe für den Zeitraum 1951 bis 2005 (Quelle: Daten nach DWD aus [9], verändert).

Urbane Temperaturen

Überwärmungen urbaner Gebiete im Vergleich zum kühleren Umland werden städtische Wärmeinseln genannt (engl. Urban Heat Island, UHI; Überblick z. B. in [15]). Diese beziehen sich im Allgemeinen auf horizontale Temperaturunterschiede zwischen städtischen Baukörpern und unbebautem Umland (Messhöhe über Grund: 2 m). Städtische Wärmeinseln sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. So fördert zum Beispiel eine hohe Einwohnerzahl und Bebauungsdichte eine starke Oberflächenversiegelung mit einhergehender Verdrängung verdunstungsaktiver Flächen sowie eine mächtige Dunstglocke die Ausbildung des Temperaturgegensatzes zwischen Stadt und Umland. Hierdurch kann es zu hohen Werten der UHI kommen. Hingegen verursacht Bewölkung, starker Wind oder ein hoher Grünflächenanteil an der Gesamtfläche einer Stadt eine nur schwache Wärmeinselintensität.

Den häufig verwendeten Zusammenhang zwischen dem Logarithmus der Einwohnerzahl und der maximalen Wärmeinselintensität zeigt Abb. 8. Der erklärte Varianzanteil von etwa 66 % weist darauf hin, dass neben der Einwohnerzahl weitere Faktoren (zum Beispiel Baustruktur, Durchgrünungsgrad, etc.) am Zustandekommen der städtischen Wärmeinsel beteiligt sind.

Auf Grundlage des in Abb. 8 hergestellten Zusammenhangs und unter Hinzuziehung des Versiegelungsgrades lassen sich zu prognostischen Zwecken „flächendeckende" Intensitäten der städtischen Wärmeinseln berechnen.

Verschneidet man nämlich diese beiden Variablen statistisch miteinander und ordnet die Ergebnisse Verwaltungseinheiten, zum Beispiel Kreisen oder

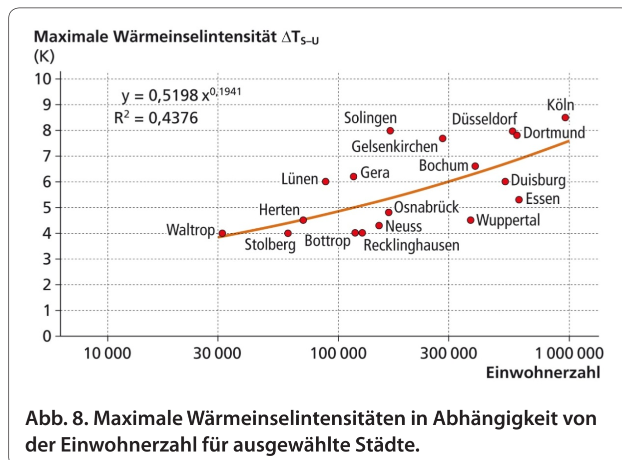


Abb. 8. Maximale Wärmeinselintensitäten in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl für ausgewählte Städte.

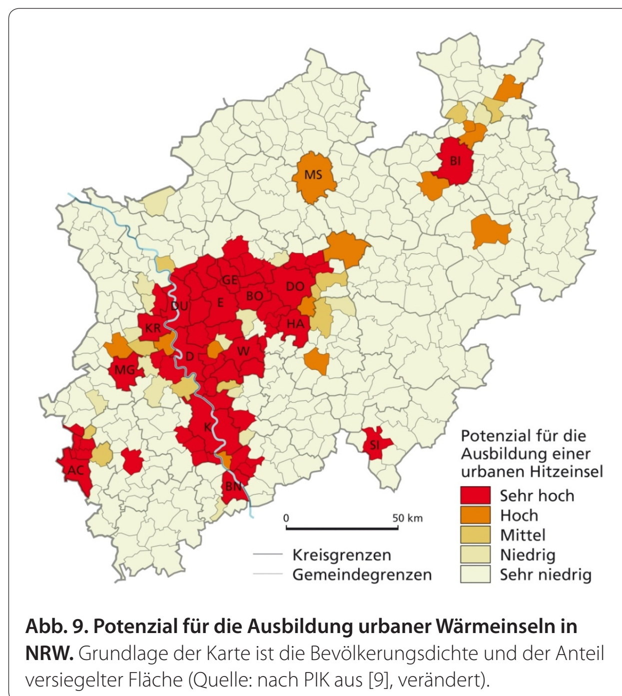


Abb. 9. Potenzial für die Ausbildung urbaner Wärmeinseln in NRW. Grundlage der Karte ist die Bevölkerungsdichte und der Anteil versiegelter Fläche (Quelle: nach PIK aus [9], verändert).

Gemeinden zu, erhält man die in Abb. 9 für NRW dargestellte exemplarische Verteilung der städtischen Wärmeinselintensitäten. Wie die Karte zeigt, weisen insbesondere die Stadtlandschaften an Ruhr und Rhein flächendeckend besonders hohe Werte auf, aber auch Großstädte in Einzellage, wie Münster und Bielefeld, erreichen ein hohes bis sehr hohes Wärmeinselpotenzial. Bei geeigneten Wetterlagen können UHI-Intensitätswerte erreicht werden, die maximalen Temperaturdifferenzen von bis zu 9 K entsprechen, wie eine in der Stadt Essen durchgeführte Messung bei Strahlungswetter verdeutlicht hat.

In Stadtquartieren, die bereits unter den gegebenen klimatischen Bedingungen Wärmeinseln aufweisen, dürften die sommerliche Anzahl, Intensität und Andauer

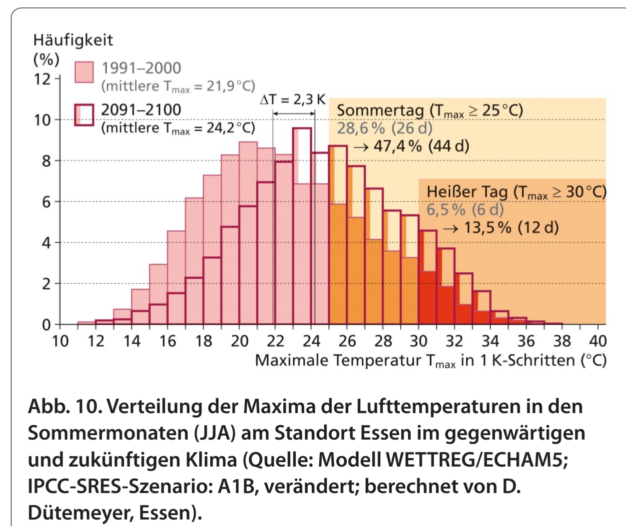


Abb. 10. Verteilung der Maxima der Lufttemperaturen in den Sommermonaten (JJA) am Standort Essen im gegenwärtigen und zukünftigen Klima (Quelle: Modell WETTREG/ECHAM5; IPCC-SRES-Szenario: A1B, verändert; berechnet von D. Dütemeyer, Essen).

der Überwärmungsepisoden durch den Klimawandel zunehmen, falls diesen nicht durch Maßnahmen der Stadt- und Umweltplanung im Laufe der Zeit entgegengewirkt wird.

In welchem Maße sich das thermische Klima verändern wird, lässt sich auch mit Hilfe sogenannter klimatischer Ereignistage quantifizieren. Hierbei handelt es sich um Schwellenwerte einer meteorologischen Größe, die zum Beispiel im Laufe eines Tages unter- oder überschritten werden [5]. So wird ein Sommertag mit einem Maximalwert der Lufttemperatur von größer oder gleich 25 °C definiert.

Geht man beispielsweise davon aus, dass der aktuelle Mittelwert der Lufttemperaturmaxima der Sommermonate Juni, Juli und August unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen in Essen 21,9 °C beträgt, so ergibt sich gemäß der in Abb. 10 dargestellten Verteilung der Lufttemperaturmaxima eine durchschnittliche Anzahl von 26 Sommertagen. Stellt man die These auf, dass in einem zukünftigen Klima des Ruhrgebietes die Lufttemperaturmittelwerte in Essen um 2,3 K zunehmen, dann wird es zu einem Anstieg um weitere 18 Tage, auf dann 44 Sommertage, kommen. Das sind immerhin fast anderthalb Monate, an denen Sommertage im mittleren Ruhrgebiet während des Sommers vorherrschen werden. Heiße Tage, an denen die Lufttemperaturmaxima sogar ≥ 30 °C erreichen, nehmen unter den gegebenen Bedingungen von heute 6 Tage ein, unter den Konditionen des Klimawandels wird sich diese Zahl auf 12 Tage erhöhen und damit verdoppeln.

Diese Zahlen verdeutlichen auch eindrucksvoll, dass bei der Abschätzung der Klimawandelfolgen die alleinige Betrachtung der Änderung von Jahresmitteltemperaturen (hier +2,3 K) über die Brisanz der Konsequenzen hinwegtäuscht, da in der zugehörigen Verteilungsstatistik

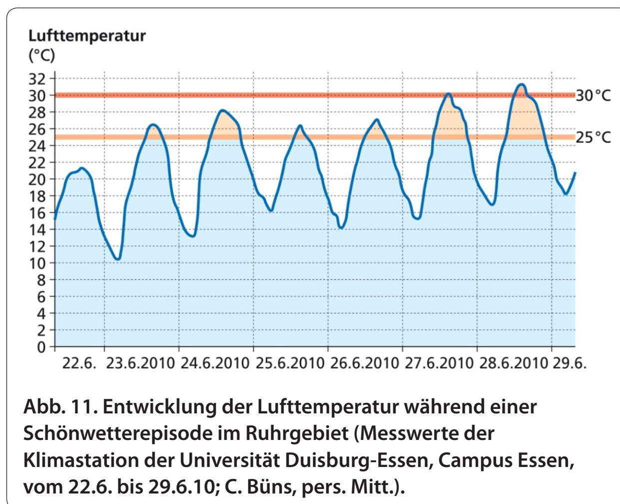


Abb. 11. Entwicklung der Lufttemperatur während einer Schönwetterepisode im Ruhrgebiet (Messwerte der Klimastation der Universität Duisburg-Essen, Campus Essen, vom 22.6. bis 29.6.10; C. Büns, pers. Mitt.).

gerade die Extremwerte eine deutliche Änderung erfahren. Denn trotz des moderaten Anstiegs der Durchschnittstemperatur werden sich extreme Temperaturereignisse wie Sommertage oder heiße Tage in ihrer Anzahl vervielfachen.

Aber auch die Änderung der Jahresmitteltemperatur von nur wenigen Kelvin kann bereits die Verschiebung eines Standortes in eine andere Klimazone bedeuten. Würde beispielsweise die für Essen genannte mittlere Temperaturerhöhung von 2,3 K auf moderate 3,5 K erhöht, entspräche das in etwa dem heutigen Klima der Stadt Mailand in Norditalien.

Der Eintritt einer Hitzeepisode stellt sich nicht „über Nacht“, das heißt in kurzer Zeit, ein, sondern erreicht durch kontinuierlichen Temperaturanstieg das genannte hohe Temperaturniveau. Das bedeutet, dass die Anzahl der erwähnten thermischen Ereignistage eher als Untergrenze einer anthropogenen Wärmebelastung anzusehen ist. Dabei ist es nicht ausschließlich die tagsüber herrschende Hitze, die die Wärmebelastung des Menschen verursacht, sondern häufig auch die mangelnde nächtliche Abkühlung, die eine gesunde Schlaftiefe verhindert [16].

Wie Abb. 11 zu entnehmen ist, steigen nämlich nicht nur die Tagesmaxima der Lufttemperaturen an, sondern, da die nächtliche Abkühlung die sich täglich erhöhende Wärmeaufnahme von Atmosphäre und Gebäuden nicht kompensieren kann, nehmen auch die Minima, mithin die Nachttemperaturen, mit Fortdauer des warmen Wetters zu. In diesem Zusammenhang kann man von einem thermischen „Akkumulationseffekt“ sprechen. So stiegen während der in Abb. 11 dargestellten Schönwetterepisode die Tagesmaxima von 22 °C (23.6.10) auf fast 32 °C (29.6.10) an, während die Nachttemperaturen von 10°C zu Beginn (23.6.10) auf 18 °C bis zum Ende dieser Wetterlage (29.6.10) zunahmen.

Wärmebelastung der Stadtbewohner

Wärmebelastungen führen, wenn sie längere Zeit andauern, nicht nur zu gesundheitlichen Problemen, sondern bewirken auch volkswirtschaftliche Schäden in verschiedenen Sektoren [17].

Neben Einschränkungen oder Einbußen in der Landwirtschaft, der Binnenschifffahrt, der Industrie, der Wasserversorgung und Energiegewinnung ist auch die Bevölkerung direkt betroffen. Dieses gilt für die Arbeitswelt, und zwar nicht nur für Tätigkeiten im Freien (Bau-, Gartenbau-, Landwirtschaft, etc.), sondern auch für Tätigkeiten im Hause, solange hier nicht, wie in Industriestaaten warmer Klimazonen seit langem üblich, die Gebäude aktiv gekühlt werden.

Wärmebelastung betrifft , solange Wohnungen nicht aktiv gekühlt werden, insbesondere die Einschränkung der Erholung während der Nachtruhe („Heiße Nächte“), so dass am Tage die volkswirtschaftlich benötigte Arbeitskraft nicht in vollem Umfang zur Verfügung steht.

Während in Abb. 9 die mittlere Wahrscheinlichkeit des Auftretens unterschiedlicher Intensitäten städtischer Wärmeinseln dargestellt wurde, wird nunmehr in einem weiteren Schritt die Koinzidenz der Wärmeinselintensität, der Bevölkerungsdichte sowie des prozentualen Anteils der über 65 Jahre alten Einwohner exemplarisch für das mittlere Ruhrgebiet analysiert. Dabei spielt die Festlegung derartiger Problemgebiete auch für die Planungspraxis eine hervorgehobene Rolle. Denn es ist bekannt, dass insbesondere ältere Menschen eine höhere Anfälligkeit gegen Überwärmung aufweisen. Das hier vorgestellte Beispiel belegt (Abb. 12), dass hochversiegelte Innenstadtgebiete mit sehr hohen Wärmeinselintensitäten nicht unbedingt zu den anfälligsten Gebieten zählen, denn in diesen ist der Anteil der Wohnbevölkerung häufig eher gering. Wesentlich größere Probleme können dichtbebaute Wohngebiete aufweisen, die außerhalb des Innenstadtbereiches liegen, und sich durch eine hohe Einwohnerdichte, insbesondere an älteren Menschen, auszeichnen [11].

Werden bestimmte Grenzwerte der Wärmebelastung überschritten, die zum Beispiel mit Hilfe entsprechender thermischer Indices wie PET (Physiologically Equivalent Temperature), pt (perceived temperature, gefühlte Temperatur), PMV (Predicted Mean Vote, [18]) oder UTCI (Universal Thermal Climate Index, [19]) ermittelt werden können, ist von erhöhten Morbiditäts- oder sogar Mortalitätsraten auszugehen. So hatten sich in Mitteleuropa während der beiden sommerlichen Hitzewellen im Jahr 2003 die Sterberaten signifikant erhöht [20,21]. In Deutschland waren seinerzeit über die statistische Erwartung hinaus zusätzlich etwa 7000 Personen während der Hitzewelle gestorben, in Frankreich sogar 14000 Menschen.

Die Hitzewellen im Sommer 2003, aber auch im Jahre 2010, haben zum Beispiel im Ruhrgebiet dazu geführt,

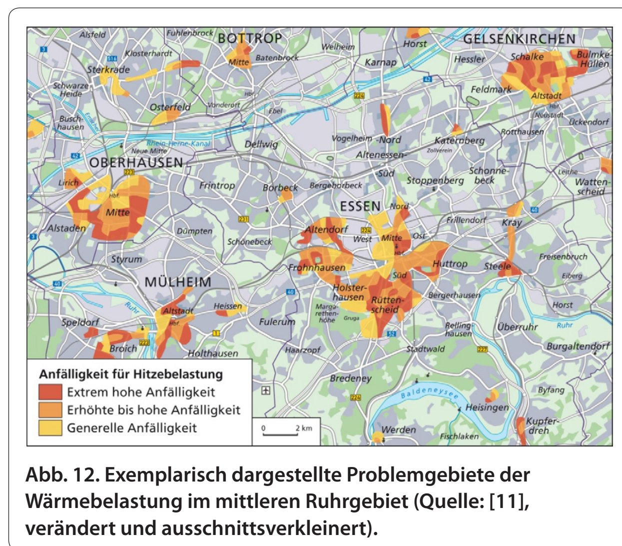


Abb. 12. Exemplarisch dargestellte Problemgebiete der Wärmebelastung im mittleren Ruhrgebiet (Quelle: [11], verändert und ausschnittsverkleinert).

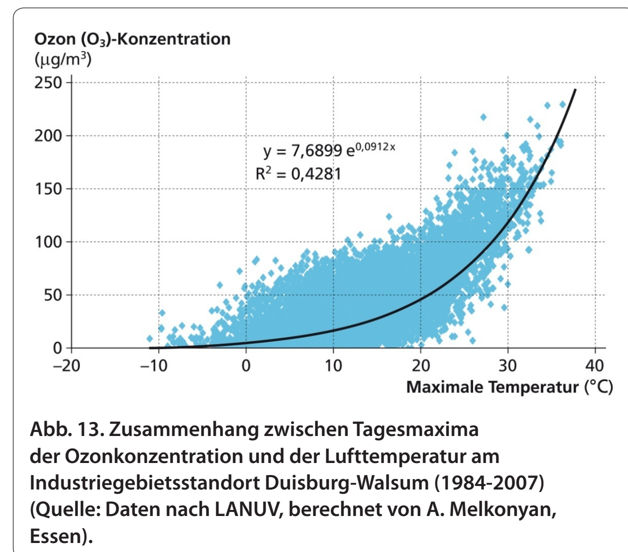


Abb. 13. Zusammenhang zwischen Tagesmaxima der Ozonkonzentration und der Lufttemperatur am Industriegebietsstandort Duisburg-Walsum (1984-2007) (Quelle: Daten nach LANUV, berechnet von A. Melkonyan, Essen).

dass der Verkauf mobiler Klimaanlagen zur aktiven Kühlung von Wohnungen und Häusern außergewöhnlich stark anstieg. In einzelnen Baumärkten waren diese Geräte sogar zeitweise ausverkauft. Zwar lassen sich mit Hilfe von Klimaanlagen Innenräume wirksam kühlen, da jedoch die Nennleistung von mechanischen dezentral angebrachten Klimaanlagen in der Regel 10 kW pro Gerät aufweist, kann daraus bei einem angenommenen 10-stündigen täglichen Betrieb ein Stromverbrauch von bis zu 100 kWh/d resultieren. Erfolgt dieser Einsatz in einer Vielzahl von Gebäuden, ergibt sich ein zusätzlicher, hoher Strombedarf bei heißer Witterung. Dieser wurde für das Versorgungsnetz der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke (RWE) im besonders warmen Sommer 2003 bereits nachgewiesen [4]. Mit der Inbetriebnahme von Klimaanlagen ist wegen der höheren Kraftwerksleistung neben einem verstärkten CO_2-Ausstoss auch eine zusätzliche Zufuhr von Warmluft in die Stadtatmosphäre verbunden. Da prognostiziert wird, dass der Klimawandel die Anzahl der Hitzewellen erhöhen wird, sollte es Ziel einer vorbeugenden Objekt- und Stadtplanung sein, durch geschickte temperatursenkende planerische Maßnahmen den Einsatz von Klimaanlagen möglichst zu reduzieren oder sogar überflüssig zu machen. Dadurch könnten zusätzliche CO_2-Emissionen vermieden werden (s. dazu Teil 2 dieses Betrags).

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass auch in Deutschland das Stromverbrauchsverhältnis zwischen Sommer (JJA; 124.241 Mio kWh) und Winter (DJF; 136.069 Mio kWh) mit einem derzeitigen Sommer/Winter Quotienten von 0,9 [22] größer wird, da der Bedarf an Kühlenergie in der warmen Jahreszeit ansteigen dürfte, bei gleichzeitig sinkendem Energieverbrauch im Winter. Matzarakis et al. [23] schätzen den Rückgang an winterlicher Heizenergie für die Stadt Freiburg/Brsg. beispielsweise auf 30 % im Vergleich zum heutigen Verbrauch. Hingegen wurde für den subtropischen Agglomerationsraum Tokio anhand von Simulationsrechnungen ermittelt, dass sich der Energieverbrauch bei einem Anstieg der Lufttemperaturen von 1 K um 3 % erhöhen wird [24].

Luftqualität

Inwieweit sich die weiterhin global ansteigenden Temperaturen auf die Luftqualität in den Ballungsräumen auswirken werden, soll am Beispiel der aktuell wichtigsten Indikatoren für die Luftverschmutzung, Ozon und Feinstaub (PM_{10}), nachfolgend untersucht werden.

Ozon

Wegen der prognostizierten Zunahme sonnenscheinreicher Witterungsabschnitte bei überwiegender Wolkenarmut wird es nicht nur zu einer Erhöhung der Globalstrahlungsstromdichte, sondern auch zu einem Temperaturanstieg kommen. Da sowohl hohe Temperaturen als auch kräftige Sonneneinstrahlung wichtige Voraussetzungen zur Bildung des sekundären Spurenstoffs Ozon sind, dürften die Ozonkonzentrationen bei Zunahme der Anzahl der Hitzewellen ansteigen [25,26]. Ein eindrucksvolles Beispiel der Temperatur abhängigen Entstehung von Ozon zeigt Abb. 13. Hiernach belaufen sich die mittleren Ozonkonzentrationen bei einer Temperatur von 10 °C auf rund 19 µg/m³, bei 20 °C schon auf 47 µg/m³ und steigen bei 30 °C sogar auf 119 µg/m³ an. Dieser exponentielle Anstieg hängt damit zusammen, dass das Vorläufergas Peroxyacetylnitrat (PAN), welches an der Ozonbildung beteiligt ist, erst bei höheren Temperaturen zersetzt wird, wodurch entsprechende Stickstoffverbindungen freigesetzt werden, die wiederum die Grundlage der Ozonentstehung unter Beteiligung

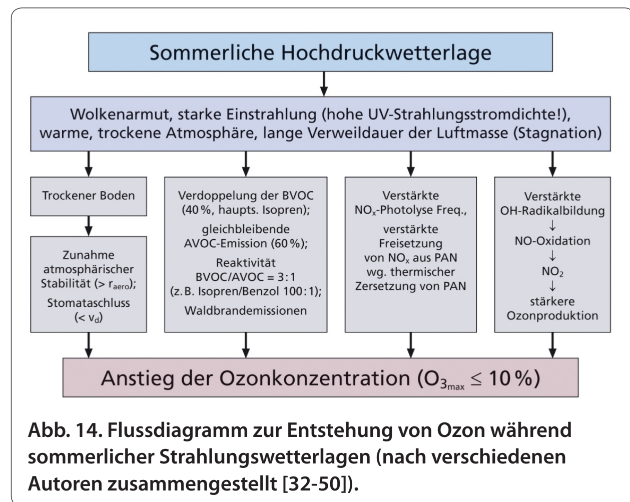


Abb. 14. Flussdiagramm zur Entstehung von Ozon während sommerlicher Strahlungswetterlagen (nach verschiedenen Autoren zusammengestellt [32-50]).

von Kohlenwasserstoffen (engl. Volatile Organic Compounds, VOCs) sind. Die VOCs lassen sich zwei Gruppen zuordnen, den anthropogenen VOCs (AVOCs; zum Beispiel Benzol, Toluol, Xylol) und den biogenen VOCs (BVOCs). Letztere werden bei hohen Temperaturen von Laub- und Nadelbäumen, aber auch Sträuchern abgegeben (zum Beispiel Isopren oder auch Terpen). Der pflanzenphysiologische Grund ist noch nicht genau bekannt, möglicherweise handelt es sich auch um thermische Stressreaktionen [27]. Zwar dürften BVOCs in der Stadtatmosphäre nur in geringen Konzentrationen zu erwarten sein, da ihre Emissionsraten jedoch starktemperaturabhängig sind, ist auch im urbanen Raum bei sommerlichen Strahlungswetterlagen mit einer zusätzlichen Ozonentstehung durch biogene Spurenstoffe zu rechnen. Um eine durch biogene VOCs verstärkte Ozonbildung zu vermeiden, sollten deshalb insbesondere solche Pflanzen als Stadtgrün verwendet werden, die nur geringe Mengen dieser Spurenstoffe an die Luft abgeben (s. hierzu Teil 2 dieses Beitrags).

Inwiefern sich die Ozonbelastung für den Menschen in einem zukünftigen Klima verändern wird, zeigt ein Vergleich der Anzahl der Überschreitungstage des seit Januar 2010 gültigen Zielwertes für Ozon zum Schutz der menschlichen Gesundheit (höchster 8-Stunden-Mittelwert eines Tages ≥ 120 µg/m³, 25 zulässige Überschreitungen pro Kalenderjahr, gemittelt über 3 Jahre) zu denjenigen Werten, die sich für die genannten veränderten Klimabedingungen ergeben. Daran gemessen, wird sich die Anzahl der Überschreitungstage im Ruhrgebiet (berechnet für den Standort Duisburg-Walsum) von derzeit 16 Tage auf zukünftig 33 Tage mehr als verdoppeln (A. Melkonyan, pers. Mitt.).

Im Überblick kann für die Entstehung von Ozon während sommerlicher Strahlungswetterlagen bzw. Hitzewellen festgestellt werden, dass insbesondere vier Faktorengruppen für einen Anstieg der Ozonkonzentrationen verantwortlich sein dürften (Abb. 14). Danach wird (1) trockener Boden und der vorzeitige Stomataschluss der Pflanzen zu einer geringeren Deposition an den Oberflächen bzw. Aufnahme in den Pflanzenkörper führen. Da sich wegen der hohen Temperaturen (2) die Emission biogener VOCs exponentiell verstärken wird, die Abgabe der AVOCs sich jedoch kaum verändern dürfte, sollte in Stadtquartieren mit einem hohen Anteil BVOC–emittierender Pflanzen die Ozonentstehung zunehmen. Das in der Stadtatmosphäre verstärkt auftretende NO_X (3) unterliegt wegen der höheren globalen Strahlungsstromdichte einer verstärkten Photolyse. Hierdurch und durch die thermische Instabilität des PAN bei Temperaturen ≥ 25 °C werden Ozonvorläufersubstanzen bereitgestellt. Schlussendlich (4) wird sich unter den genannten Witterungsbedingungen eine verstärkte OH-Radikalbildung einstellen, die das in der Luft enthaltene NO zu NO_2 oxidiert und letzteres somit als weitere Quelle von Vorläufergasen zu betrachten ist. Nach den zu Abb. 14 aufgeführten Verfassern ist schließlich davon auszugehen, dass es durch den globalen Klimawandel zu einem maximalen Anstieg der Ozonkonzentrationen von bis zu 10 % im Vergleich zu den derzeitigen klimatischen Verhältnissen kommen sollte.

Feinstaub (PM_{10})

Im Rahmen der Diskussion über Feinstaub als gesundheitsgefährdende Luftverschmutzung fällt den PM_{10}-Partikeln eine besondere Bedeutung zu. Das liegt unter anderem daran, dass entsprechende Messmethoden für diese Partikelgröße schon seit einigen Jahren verfügbar sind. Obwohl kleineren Partikeln (feine Partikeln $PM_{2,5}$, PM_1) und erst recht ultrafeinen Partikeln (< PM_1) eine stärkere Gesundheitsgefährdung zugesprochen wird, lassen sich diese nur mit größerem technischen Aufwand nachweisen und sind deshalb noch nicht Bestandteil operationell betriebener Messnetze [28]. Unter PM_{10}-Partikeln versteht man Stäube mit einem aerodynamischen Durchmesser von höchstens 10 µm, die mit einer Abscheidewirksamkeit von 50 % mittels eines Impaktors gemessen werden können. Die Diskussion, in welchem Maße sich ansteigende Temperaturen durch den globalen Klimawandel, und erst recht Hitzewellen, auf die Partikelkonzentration auswirken, soll am Beispiel von PM_{10}-Partikeln dargestellt werden. Allein für diese Korngrößen stehen kontinuierliche Daten – allerdings nur für wenige Jahre – von ausgewählten Messstationen zur Verfügung. Obwohl die Emissionssituation sehr vielseitig ist, wird der Straßenverkehr in dichtbebauten Stadtquartieren als wesentliche Quelle von Partikeln angesehen [29].

Zur Analyse des Zusammenhangs zwischen der Partikelkonzentration und der Lufttemperatur wurde

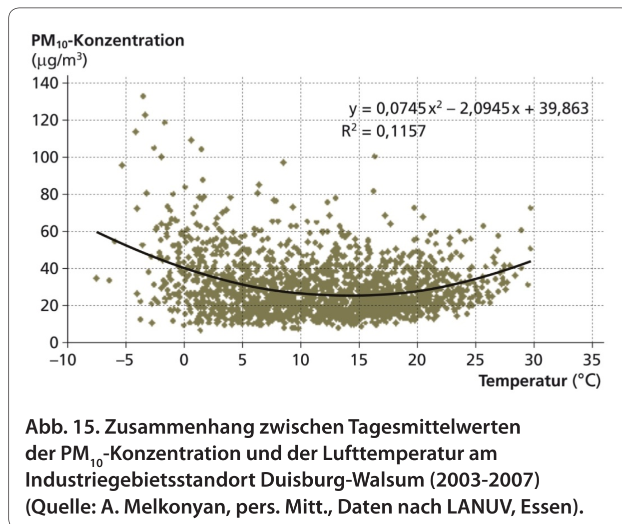


Abb. 15. Zusammenhang zwischen Tagesmittelwerten der PM_{10}-Konzentration und der Lufttemperatur am Industriegebietsstandort Duisburg-Walsum (2003-2007) (Quelle: A. Melkonyan, pers. Mitt., Daten nach LANUV, Essen).

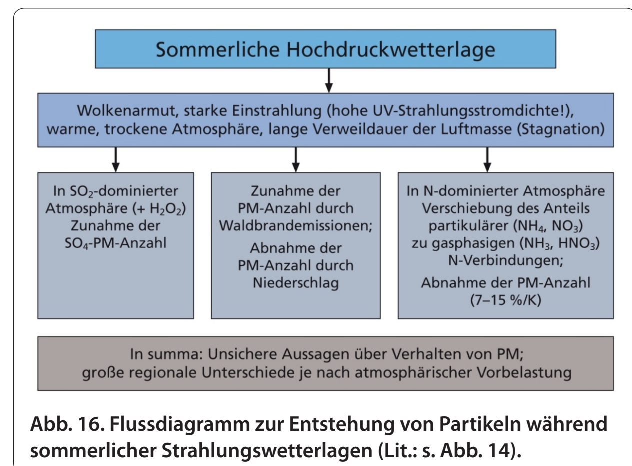


Abb. 16. Flussdiagramm zur Entstehung von Partikeln während sommerlicher Strahlungswetterlagen (Lit.: s. Abb. 14).

eine fünfjährige Messreihe eines Industriegebietsstandortes herangezogen (Abb. 15).

Hiernach beläuft sich der erklärte Varianzanteil, der durch die eingezeichnete Regressionskurve repräsentiert wird, auf nur 34 %. Zwar ergeben sich höchste Partikelkonzentrationen bei Temperaturen < 0 °C, jedoch nehmen mit steigenden Temperaturen die Konzentrationen wieder leicht zu, sodass eine eindeutige temperaturabhängige Zuordnung nicht erfolgen kann. Die für den Spurenstoff Ozon nachgewiesene hohe Varianzerklärung von mehr als 65 % und die Aussage, dass sich während des Vorherrschens von Hitzewellen die Ozonkonzentrationen exponentiell erhöhen, zeigt sich für die PM_{10}-Verteilung jedenfalls nicht in dieser Eindeutigkeit [30].

Die Beantwortung der Frage, warum die PM_{10}-Konzentration keine strenge Abhängigkeit zur Lufttemperatur zeigt, soll mit Hilfe der Abb. 16 gegeben werden. Danach ist es so, dass wenigstens drei Faktoren maßgeblichen Anteil am Zustandekommen hoher Partikelanzahl- und -massenkonzentrationen in der Luft haben können. Grundsätzlich wird bei trockener langandauernder Witterung die Gefahr von Bränden, insbesondere Waldbränden, zunehmen. Im Falle eines Waldbrandes können primäre Partikel aus der Verbrennung entstehen und in die Atmosphäre gelangen und somit zu einer Erhöhung der Konzentration führen.

Ferner können bei hohen Temperaturen im Rahmen der Gas-zu-Partikel-Umwandlung in einer Schwefeldioxid (SO_2) dominierten Atmosphäre Sulfatpartikel gebildet werden, wodurch es zu einem Anstieg der PM-Konzentration kommen kann. Das gilt insbesondere für diejenigen Ballungsräume, in denen in hohem Maße SO_2 emittiert wird (Beispiel Peking). In der Luft von Metropolregionen, in die hingegen im Wesentlichen Stickstoffverbindungen in die Atmosphäre emittiert werden, erfolgt bei hohen Temperaturen eine Umwandlung der partikulären Bestandteile (zum Beispiel Ammoniumnitrat, NH_4NO_3) in gasförmige Komponenten, so dass dort die Partikelanzahl sinkt. Zusammenfassend bedeutet das, dass es regional, aber auch saisonal zu sehr unterschiedlichen Einflüssen auf die Partikelkonzentration kommen kann, je nachdem, ob eine Schwefel- oder Stickstoff dominierte Atmosphäre vorherrscht. Dabei kann es durchaus vorkommen, dass sich beide Arten der Luftverschmutzung in einer Metropolregion im Jahresverlauf abwechseln, wenn zum Beispiel im Winter mehr SO_2 durch Verbrennung fossiler Energieträger emittiert wird, während dieser Einfluss im Sommer weitgehend wegfällt und stattdessen Stickstoffemissionen durch Kraftfahrzeuge dominieren.

Für den ersten Teil dieses Beitrags bleibt abschließend festzustellen, dass der globale Klimawandel nicht nur die thermischen und hygrischen, sondern auch die lufthygienischen Wirkungsfaktoren im Lebensraum des Menschen nachhaltig beeinflussen wird. Im zweiten Teil des Beitrags sollen Maßnahmen beschrieben werden, mit deren Hilfe den negativen klimatischen Einflüssen auf lokaler Ebene entgegengewirkt werden kann.

Received: 28 January 2011 Accepted: 7 March 2011 Published: 11 March 2011

Literatur

1. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
2. Keeling CD, Whorf TP, Wahlen M, van der Plicht J (1995): Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxid since 1980. Nature, 375 : 666-670
3. Dr. Pieter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)
4. Kuttler W (2009): Klimatologie. 260 S., UTB 3099. F. Schöningh, Paderborn
5. Hupfer P, Kuttler W (2006): Witterung und Klima, 12. Auflage, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 554 S
6. Hofmann DJ, Butler JH, Tans PP (2009): A new look at atmospheric carbon dioxide. Atmospheric Environment 43 : 2084-2095
7. Ruckstuhl C, Norris JR (2009): How do aerosol histories affect solar

"dimming" and "brightening" over Europe? : IPCC-AR4 models versus observations, J. Geophys. Res., 114, D00D04, doi:10.1029/2
8. Larson TV (1980): Secondary aerosol: production mechanisms of sulfate compounds in the atmosphere. Annals of the New York Academy of Sciences, 338 : 26–38
9. MUNLV -Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (Hrsg.) (2009): Anpassung an den Klimawandel. – Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf, 166 S.
10. Spekat A, Enke W, Kreienkamp F (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRESSzenarios B1, A1B und A2.
11. MUNLV -Minist. f. Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (Hrsg.) (2010): Handbuch Stadtklima - Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel (Langfassung). Düsseldorf, 268 S.
12. Groß G (1996): Stadtklima und Globale Erwärmung. Geowissenschaften **14:** 245-248
13. Jacob DJ, Winner DA (2009): Effect of climate change on air quality. Atmospheric Environment **43:** 51-63
14. Grimmond S (2007): Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. Geographical Journal **173:** 83-88
15. Kuttler W (2010): Urbanes Klima.- Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft, Umweltmeteorologie, Teil 1: 70, Nr. 7/8 - Juli/August, 329-340; Teil 2: 70, Nr. 9 - September, 378-382.
16. Höppe P (1984): Die Energiebilanz des Menschen.- Münchner Universitäts-Schriften, Fachbereich Physik, Wiss. Mitteilungen Nr. 49
17. UBA (= Umweltbundesamt) (2008): Klimawandel in Deutschland Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme.
18. Mayer H (2006): Indizes zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen und lufthygienischen Komponente des Klimas. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 66, 4, 165-174
19. Jendritzky G, Bröde P, Fiala D, Havenith G, Weihs P, Batchvarova E, de Dear R (2010): The Universal Thermal Climate Index UTCI. Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Nr. 20, April 2010 - Proceedings of the 7th Conference on Biometeorology, 184-188
20. Souch C, Grimmond S (2004): Applied Climatology: heat waves. Physical Geography **28:** 599-606
21. Jendritzky G (2007): Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In: Endlicher W., Gerstengarbe F-W (Hrsg): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Berlin, Potsdam, S. 108-118
22. BDEW (= Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.), Berlin, Mitteilung über Stromverbrauch in Deutschland für 2009
23. Matzarakis A, Thomsen F, Mayer H (2009): Klimawandel und Heizgradtage in Freiburg im Breisgau, Südwestdeutschland.- Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft, 66, 7/8, 319-324
24. Genchi Y, Kikegawa Y, Kondo H, Yoshikado H (2003): Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. Appl. Energy **76:** 449-466
25. Lin CYC, Jacob DJ, Fiore AM (2001): Trends in exceedances of the ozone air quality standard in the continental United States, 1980-1998. Atmospheric Environment **35:** 3217-3228
26. Kuttler W, Straßburger A (1999): Air pollution measurements in urban parks. Atmospheric Environment **33:** 4101-4108
27. Sharkey TD, Wiberley A.E, Donohue AR (2008): Isoprene emission from plants: why and how. Annals of Botany **101:** 5-18
28. Weber S, Kuttler W, Werber K (2006): Meteorologische Beeinflussung von Partikelzahl- und Massenkonzentrationen (PM10, PM2,5, PM1) in einer Straßenschlucht. - Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 66, (11/12), 489-494.
29. Van Dingenen R, Raes F, Putaud JP, Baltensperger U, Charron A, Facchini MC, Decesari S, Fuzzi S, Gehrig R, Hansson HC (2004): A European aerosol phenomenology-1: Physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. Atmospheric Environment **38:** 2561-2577
30. Holst J, Mayer H, Holst T (2008): Effect of meteorological exchange conditions on PM10 concentration. Meteorologische Zeitschrift, **17:** 273-282
31. Schönwiese C-D, Walter A, Brinckmann S (2010): Statistical assessments of anthropogenic and natural global climate forcing. An update. Meteorologische Zeitschrift, 19, 1, 3-10
32. Benjamin MT, Winer, AM (1998): Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. Atmospheric Environment, **32:** 53-68
33. Chameides WL, Lindsay RW, Richardson J, Kiang CS (1988): The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study. Science **241:** 1473-1475
34. Dawson JP, Adam PJ, Pandis SN (2007): Sensitivity of ozone to summertime climate in the eastern USA: A modeling case study. Atmospheric Environment, 41, 1494–1511
35. Emeis S, Schoenemeyer T, Richter K, Ruckdeschel W (1997): Sensitivity of ozone production to VOC and NOx emissions - A case study with the box-model BAYROZON. Meteorologische Zeitschrift 6, N.F., 60-72
36. Solmon F, Sarrat C, Serça D,Tulet P, Rosset P (2004): Isoprene and monoterpenes biogenic emissions in France: modeling and impact during a regional pollution episode. Atmospheric Environment, 38, 23, 3853-3865
37. Forkel R, Knoche R (2006): Regional climate change and its impact on photooxidant concentrations in southern Germany: Simulations with a coupled regional climate-chemistry model. Journal of Geophysical Research 111, No. D12, D12302, doi: 10:1029/2005JD006748, 13pp.
38. Held A, Nowak A, Birmili W, Wiedensohler A, Forkel R, Klemm O. (2004): Observations of particle formation and growth in a mountainous forest region in central Europe. Journal of Geophysical Research 109, D23204
39. Klemm O, Stockwell WR, Schlager H, Krautstrunk M (2000): NOx or VOC limitation in East German ozone plumes. Journal of Atmospheric Chemistry **35:** 1-18
40. Mayer H, Schmidt J (1998): Problematik der Kennzeichnung von sogenannten „Ozon-Wetterlagen". Meteorologische Zeitschrift 7, N. F., 41-48
41. Meleux F, Solmon F, Giorgi F (2007): Increase in summer European ozone amounts due to climate change. Atmospheric Environment, 41, 35, 7577-7587
42. Meng Z, Dabdub D, Seinfeld JH (1997): Chemical Coupling between Atmospheric Ozone and Particulate Matter. Science **277:** 116 – 119.
43. Narumi D, Kondo A, ShimodaY (2009): The effect of the increase in urban temperature on the concentration of photochemical oxidants. Atmospheric Environment **43:** 2348-2359
44. Pöschl U (2005): Atmosphärische Aerosole: Zusammensetzung, Transformation, Klima- und Gesundheitseffekte. Angewandte Chemie, **117:** 46, 7690-7712
45. Sillmann S (1999): The relation between ozone, NOx and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. Atmospheric Environment, **33:** 1821-1845
46. Solberg S, Coddeville P, Forster C, Hov Q, Orsolini Y, Uhse K (2005): European surface ozone in the extreme summer 2003. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions **5:** 9003-9038
47. Straßburger A (2004): Analyse atmosphärischer Spurengase zur Bestimmung des lufthygienischen Erholungswertes eines urbanen Parks. Dissertation, Essen.
48. Taha H (1996): Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. Atmospheric Environment, 30, 20, 3423-3430
49. Wu D, Wang Y, Lin X, Yang J (2008): On the mechanism of the cyclonic circulation in the Gulf of Tonkin in the summer. Journal of Geophysical Research 113, C09029, doi:10.1029/2007JC004208.
50. Yashuda R, Nakagawa F, Yoshida A (2009): Numerical study on summer-time photochemical pollution in Osaka area. - Proceedings of the7th ICUC, 29 June-3 July, Yokohama, Japan

doi:10.1186/2190-4715-23-11
Cite this article as: Kuttler W: Climate change in urban areas, Part 1, Effects. *Environmental Sciences Europe* 2011, **23**:11.

View publication stats